

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. КАРАЗІНА

В.О. ГІРКА, І.О. ГІРКА

**ТЕОРІЯ
АЗИМУТАЛЬНИХ
ПОВЕРХНЕВИХ ХВИЛЬ**

Харків 2011

УДК 533.951
ББК 22.333
Г51

Рецензенти: **В. М. Яковенко**, академік НАН України, директор Інституту радіофізики та електроніки НАН України, м. Харків;
В. І. Мірошніченко, член-кореспондент НАН України, заступник директора Інституту прикладної фізики НАН України, м. Суми.

Рекомендовано Вченою радою Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № 9 від 24 жовтня 2010 р.)

В. О. Гірка
Г51 Теорія азимутальних поверхневих хвиль : монографія / В. О. Гірка, І. О. Гірка. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2011. – 233 с.

ISBN 978-966-623-699-2

Викладено теорію збудження, загасання та поширення електромагнітних хвиль поперек осі симетрії циліндричних металевих хвильоводів із плазмовим наповненням. Досліджено частотні спектри та просторовий розподіл полів цих хвиль у хвильоводах різної конструкції, враховано неоднорідність плазми та зовнішнього магнітного поля, проаналізовано вплив на ці характеристики хвиль відмінності перерізу плазми та стінки хвильоводу від кола, протікання аксіального електричного струму у плазмі, наявності малих аксіальних хвильових чисел. Проаналізовано взаємодію цих хвиль із кільцевими пучками електронів та можливості підтримання цими хвилями газових розрядів.

Для студентів магістерської підготовки, аспірантів та науковців, які спеціалізуються в галузі фізики плазми, радіофізики, електродинаміки неоднорідних середовищ.

УДК 533.951
ББК 22.333

ISBN 978-966-623-699-2

© Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2011
© Гірка В. О., Гірка І. О., 2011
© Дончик І. М., макет обкладинки, 2011

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	7
Розділ 1. АЗИМУТАЛЬНІ ПОВЕРХНЕВІ ХВИЛІ (АПХ) В МЕТАЛЕВИХ ХВИЛЕВОДАХ КРУГЛОГО ПЕРЕРІЗУ	12
1.1. Незвичайно поляризовані АПХ у магнітоактивних плазмових хвильоводах	14
1.2. Поширення незвичайно поляризованих АПХ уздовж межі плазми з металом	19
1.3. Незвичайно поляризовані АПХ в ізотропних плазмових хвильоводах	22
1.4. Незвичайно поляризовані АПХ у замагнічених плазмових хвильоводах	25
1.5. Випромінювання незвичайно поляризованих АПХ крізь щілину в екрані хвильоводу	30
1.6. Звичайно поляризовані азимутальні електромагнітні збурення	35
1.7. Висновки	38
Розділ 2. АПХ У КРУГЛИХ НЕОДНОРІДНИХ ПЛАЗМОВИХ ХВИЛЕВОДАХ	39
2.1. Вплив неоднорідності радіального профілю густини плазми на спектри АПХ	40
2.2. Поширення АПХ у радіально неоднорідному зовнішньому магнітному полі	47
2.3. Вплив неоднорідності тороїдного магнітного поля на спектри АПХ у металевих хвильоводах, що повністю заповнено плазмою	48

2.4. Поширення АПХ навколо металевго кільця у неоднорідному тороїдному магнітному полі	55
2.5. АПХ у гофрованому магнітному полі	57
2.6. Висновки	63
Розділ 3. ЗВ'ЯЗАНІ АПХ У СТРУМОНЕСУЧИХ ХВИЛЕВОДАХ	64
3.1. Зв'язані низькочастотні АПХ у неоднорідному плазмовому хвилеводі зі струмом	65
3.2. Зв'язані високочастотні АПХ, які поширюються навколо поверхні металевго струмонесучого циліндра, що його поміщено до магнітоактивної плазми	72
3.3. Зв'язані високочастотні АПХ в магнітоактивному плазмовому хвилеводі, що його повністю заповнено струмонесучою плазмою	81
3.4. Зв'язані високочастотні АПХ в коаксіальному плазмовому хвилеводі, що його повністю заповнено струмонесучою магнітоактивною плазмою	89
3.5. Висновки	96
Розділ 4. НАГРІВАННЯ ПЛАЗМИ ЧЕРЕЗ ЗАГАСАННЯ АПХ ТА ЗАСТОСУВАННЯ АПХ ДЛЯ ПІДТРИМАННЯ ГАЗОВИХ РОЗРЯДІВ	97
4.1. Електродинамічна модель газового розряду на АПХ в магнітоактивних металевих хвилеводах, які повністю заповнено плазмою	98
4.2. Вплив наявності тонкого діелектричного покриття внутрішньої стінки хвилеводу на характеристики	

газового розряду, що його підтримують АПХ	108
4.3. Електродинамічна модель газового розряду, що його підтримують АПХ у плазмових хвилеводах без магнітного поля	111
4.4. Нагрівання радіально неоднорідної плазми внаслідок поглинання сателітних гармонік АПХ у гофрованому сталому магнітному полі	114
4.5. Висновки	118

Розділ 5. ПОПЕРЕЧНІ ПХ У МЕТАЛЕВИХ ХВИЛЕВОДАХ НЕКРУГЛОГО ПЕРЕРІЗУ

5.1. Поширення поперечних ПХ у плазмовому хвилеводі некруглого перерізу за відсутності зовнішнього магнітного поля	121
5.2. Поширення поперечних ПХ уздовж межі магнітоактивної плазми з металевим хвилеводом довільного перерізу	133
5.3. Поширення ПХ поперек осі магнітоактивного плазмового хвилеводу з діелектричним покриттям металевих стінок, які мають некруглий переріз	142
5.4. Вплив форми поперечного перерізу межі поділу плазма-діелектрик на дисперсійні властивості АПХ в магнітоактивних хвилеводах круглого перерізу	144
5.5. Резонансний вплив відмінності форми поперечного перерізу межі поділу плазма-діелектрик на дисперсійні властивості АПХ в магнітоактивних хвилеводах круглого перерізу	150
5.6. Поперечні ПХ у круглому металевому хвилеводі, який заповнено двома шарами	

різних n -напівпровідників	157
5.7. Поперечні ПХ в металевому хвилеводі прямокутного перерізу, який заповнено двома шарами n - напівпровідників	163
5.8. Висновки	168
Розділ 6. ЗБУДЖЕННЯ АПХ ПУЧКАМИ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК	170
6.1. Збудження АПХ у режимі пучкової нестійкості	171
6.2. Збудження АПХ у режимі дисипативної нестійкості	180
6.3. Вплив зовнішнього сталого електричного поля на розвиток нестійкості АПХ	187
6.4. Висновки	191
Розділ 7. ДОВГОХВИЛЬОВІ НЕСИМЕТРИЧНІ ПОВЕРХНЕВІ МОДИ ПЛАЗМОВИХ ХВИЛЕВОДІВ	192
7.1. Довгохвильові несиметричні поверхневі хвилі (ПХ) у плазмових хвилеводах за відсутності зовнішнього магнітного поля	193
7.2. Довгохвильові несиметричні ПХ у циліндричних хвилеводах, які повністю заповнено магнітоактивною плазмою	201
7.3. Висновки	211
8. ПІСЛЯМОВА	213
Список використаних джерел	216
Список використаних скорочень	233

ПЕРЕДМОВА

Дану книгу написано за результатами теоретичних досліджень, що виконувалися на кафедрі загальної та прикладної фізики нашого університету протягом понад двадцяти років. У ній на прикладі азимутальних (за напрямком поширення) електромагнітних хвиль проведено комплексне дослідження характеристик власних хвиль, що поширюються поперек осі симетрії різноманітних циліндричних хвилеводних структур. Метою авторів було зібрати в одній книзі матеріали, присвячені різним характеристикам цих поперечних хвиль: їхнім дисперсійним властивостям та впливу на них конструктивних особливостей різних хвилеводів; їхньому загасанню внаслідок різних фізичних механізмів; впливу на їхню частоту та просторовий розподіл їхніх полів неоднорідності густини плазми та зовнішнього магнітного поля; зміні форми поширення цих електромагнітних збурень, їхньої поляризації внаслідок гофрованості стінки хвилеводу чи поверхні стовпа плазми та протікання аксіального струму у плазмі; їхній взаємодії з потоками електронів; певним аспектам їхнього практичного використання та навіть демонстрації того, як на основі теорії азимутальних хвиль можна досліджувати властивості хвиль, у яких на доданок до азимутального є також не дуже велике аксіальне хвильове число. Тому матеріал, що представлено в цій книзі, буде корисним як аспірантам та студентам магістерської підготовки, що спеціалізуються у галузі фізики плазми та електродинаміки, так і фахівцям, які займаються проблемами фізики обмежених плазмових середовищ.

Інтерес до фізики плазми, що спостерігається протягом останніх п'ятдесяти років, обумовлено перш за все перспективами керованого термоядерного синтезу та космічними дослідженнями. Але при цьому пошук розв'язків складних питань, що повсякденно виникають на цьому шляху, призводить до активного розвитку різноманітних прикладних досліджень у таких суміжних галузях науки, як плазмова електроніка, фізика газових розрядів, колективні ефекти у плазмі твердих тіл тощо. Плазма, що досліджується в цих прикладних галузях науки, значно відрізняється величиною параметрів, які її характеризують, а

отже, і властивості плазми при цьому є різними. Але спільним для будь-якої плазми є те, що всі процеси, які відбуваються в ній, супроводжуються поширенням електромагнітних хвиль. Іншим об'єднуючим фактором для плазмових явищ, які спостерігаються у земних умовах, є обмеженість простору, що займає плазма. Ці дві обставини є спільними для всіх задач, що розглядаються у даній книзі та належать до такого розділу фізики плазми, як електродинаміка обмеженої плазми. Обмеженість плазми істотно впливає на дисперсійні властивості та просторовий розподіл електромагнітних полів, що поширюються в ній. У даній книзі описуються результати досліджень власних електромагнітних хвиль в обмеженій плазмі; цим вона відрізняється від таких фундаментальних монографій з електродинаміки плазми, як [1-5].

Експериментальне дослідження плазми (окрім випадку космічної плазми) відбувається в спеціально створених пристроях – уловлювачах плазми, плазмових хвилеводах, тому в ній можуть розповсюджуватися не тільки об'ємні хвилі, але й поверхневі хвилі (ПХ) [6]. Умови існування поверхневих та об'ємних хвиль у них часто не співпадають. Вивченню таких особливостей об'ємних та поверхневих хвиль присвячено монографії [7, 8], що були видані понад чверть століття тому. Але і на даний час електромагнітні хвилі у хвилеводах, що заповнені магнітоактивною плазмою, є предметом інтенсивних наукових досліджень. Їхнє широке використання в різних електронних приладах пов'язано з можливостями збуджувати їх потоками заряджених частинок та зовнішніми електромагнітними полями [9-14]. Матеріал перших двох розділів даної книги значно доповнює відомості про властивості ПХ у хвилеводах з циліндричною симетрією.

Властивості ПХ є різними в залежності від того, вздовж поверхні яких середовищ вони поширюються. Найбільш вивченими є ПХ, що поширюються вздовж межі плазма–діелектрик. Поширення ПХ уздовж межі плазма–метал на сьогодні досліджено дещо гірше. Хоча перші експериментальні результати стосовно поширення високочастотних ПХ уздовж межі напівпровідникова плазма–метал були здобуті давно [15-17], але вони

не здобули широкого наукового резонансу. В Україні питаннями поширення ПХ хвиль уздовж межі плазма–метал почали активно займатися після опублікування роботи [18]. В подальшому можливості поширення ПХ уздовж плоскої межі плазма–метал досліджувалися в [19, 20]. Якщо межа метал–магнітоактивна плазма характеризується скінченною величиною радіуса кривини, тоді вздовж неї можуть поширюватися азимутальні поверхневі хвилі (АПХ), частотний спектр яких та чий просторовий розподіл полів істотно відрізняється від випадку плоскої межі.

Результати теоретичного дослідження електромагнітних явищ в обмежених плазмових структурах широко використовуються в плазмовій [3, 12, 21-23] та напівпровідниковій електроніці [9, 10, 24, 25]. Використання таких структур у якості складових частин електронних приладів має істотні переваги порівняно з приладами вакуумної електроніки [26]. Але для практичного використання ефектів, що пов'язані з поширенням електромагнітних хвиль, слід розв'язати задачу про їх збудження. Одним із широко вживаних методів збудження хвиль у плазмі є пучковий [27-30]. Взаємодія пучків заряджених частинок з плазмою призводить до генерації інтенсивних електромагнітних хвиль, частоти яких та інкременти їхнього збудження визначаються параметрами пучково-плазмової системи. На теперішній час достатньо добре розроблено теорію пучкових нестійкостей у необмеженій плазмі та у плазмі, що знаходиться в нескінченно сильному магнітному полі. Пучкове збудження ПХ в обмеженій плазмі вивчено значно слабше [11, 12], тому корисним буде матеріал, що викладено у розділі 6 про пучкове збудження АПХ.

Останнім часом інтерес до ПХ збільшився у зв'язку з їхнім використанням для підтримання газових розрядів, які використовуються в сучасних плазмових технологіях, а саме для накачки лазерів, нанесення шарів спеціального покриття (з потрібними властивостями), обробки поверхні твердого тіла, включаючи полірування та травлення, створення джерел плазми тощо. Розробка та практичне використання джерел плазми, що використовують газові розряди за наявності зовнішнього магнітного поля, зараз є одним із пріоритетних напрямків розвитку наукоємних плазмових технологій у багатьох країнах світу [31-34]. При

цьому розряди на ПХ [35] мають низку переваг порівняно з іншими типами високочастотних та низькочастотних розрядів, а саме: ефективність передачі енергії від генератора до поверхневої моди є максимальною, оскільки ці моди є резонансними збудженнями розрядної камери; поглинання ПХ у плазмі є сильнішим, ніж для об'ємних хвиль, а тому їхня іонізаційна здатність також є вищою; практично вся енергія, що передається ПХ до плазми, поглинається; повторюваність та стійкість розрядів на таких хвилях є вищою. У даній книзі наведено прості електродинамічні моделі газових розрядів, що підтримуються АПХ.

Хоча дана книга присвячена результатам теоретичного дослідження властивостей АПХ, але на відміну від монографій [7, 8], що стали раритетами, матеріали, що включено до неї, в основному присвячено нелінійній теорії. Виключенням є тільки перший розділ, де досліджено вплив конструкції хвилеводу та величини зовнішнього магнітного поля на властивості АПХ. Але наявність цього розділу книги є необхідним з огляду на різний рівень підготовки студентів та аспірантів та через те, що у подальших розділах часто робиться посилання на лінійну теорію АПХ в однорідних плазмових хвилеводах при дослідженні нелінійних задач методами теорії збуджень. З огляду на значний інтерес до ПХ, що поширюються у структурах плазма–метал, окремий інтерес у розділі 1 становить підрозділ про поширення АПХ у металевих хвилеводах, що повністю заповнено плазмою, та навколо металевих циліндричних стрижнів, які занурено до магнітоактивної плазми.

Розділ 2 присвячено теорії АПХ у неоднорідних хвилеводах, при цьому йдеться не лише про звичну радіальну неоднорідність густини плазми та зовнішнього магнітного поля. Також у даному розділі взято до уваги можливі тороїдну неоднорідність зовнішнього магнітного поля та його гофрованість уздовж аксіального напрямку.

У розділі 3 наведено результати дослідження зв'язаних АПХ у струмонесучих хвилеводах. У цьому випадку рівняння Максвелла не розпадаються на дві незалежні підсистеми, що описують звичайно та незвичайно поляризовані моди. Тому для достатньо слабких аксіальних струмів задачу про взаємодію цих мод можна розв'язувати методами теорії збуджень.

У розділі 4 представлено електромагнітні моделі стаціонарних стадій газових розрядів, які підтримуються поширенням АПХ у випадках застосування та незастосування зовнішнього магнітного поля для режимів омичної та резонансної передачі енергії хвилі до плазми. При цьому встановлено, що теоретичні положення цих моделей відповідають результатам, які здобуто при експериментальному дослідженні газових розрядів на несиметричних ПХ. Як відомо [36-38], в режимі іонного циклотронного резонансного нагрівання термоядерної плазми саме збудження ПХ різного типу розглядається як найбільш імовірна причина нагрівання периферії плазми, що викликає небажану активну взаємодію плазми із стінкою реактора з подальшим забрудненням плазми. Тому в розділі 4 теоретично досліджується процес нагрівання плазми за рахунок різних механізмів поглинання енергії АПХ.

Розділ 5 присвячено дослідженню властивостей АПХ у хвилеводах некруглого перерізу. У цьому випадку АПХ поширюються у вигляді хвильового пакета, в аналітичних розрахунках взято до уваги, окрім основної, дві найближчі сателітні гармоніки. Використання нелінійних крайових умов для компонентів поля АПХ дозволили встановити їхній частотний спектр у цих хвилеводах.

У розділі 6 розглянуто збудження АПХ потоками електронів, що обертаються в зовнішньому магнітному полі над циліндричною поверхнею плазми. Представлені результати стосуються як лінійної за амплітудою хвилі, так і нелінійної теорії, що дозволило обрати найкращі умови збудження АПХ та прослідкувати за розвалом пучка на окремі бунчі, які поступово захоплюються у потенціальні ями хвилі.

Матеріал, що представлено у розділі 7, на нашу думку, є корисним для студентів та аспірантів, які спеціалізуються в галузі фізики плазми, прикладом того, як теорію азимутально несиметричних хвиль можна використати для створення теорії ПХ, що мають скінченну величину аксіального хвильового числа.

Автори вдячні рецензентам, які взяли на себе великий тягар роботи з ознайомлення з книгою, обговорення здобутих результатів, а також надали корисні поради, що дозволило покращити стиль викладання матеріалу.